

Dynamique saisonnière du dioxyde d'azote (NO₂) et du monoxyde de carbone (CO) dans le district d'Abidjan : analyse à l'aide de la télédétection et du WebSIG

Koffi Djaha Levix Nadir
N'Guessan Bi Vami Hermann
Konan Kouadio Justin

Université Felix Houphouët Boigny (UFHB), Côte d'Ivoire
Centre Universitaire de Recherche et d'Application
en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n9p171](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n9p171)

Submitted: 30 December 2025

Accepted: 12 March 2026

Published: 31 March 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Koffi Djaha, L.N., N'Guessan Bi, V.H., & Konan Kouadio, J. (2026). *Dynamique saisonnière du dioxyde d'azote (NO₂) et du monoxyde de carbone (CO) dans le district d'Abidjan : analyse à l'aide de la télédétection et du WebSIG*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (9), 171. <https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n9p171>

Résumé

Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, connaît une urbanisation rapide qui favorise l'augmentation des émissions atmosphériques, alors même que la ville ne dispose pas de réseaux de surveillance performants des polluants de l'air. Cette étude analyse la dynamique saisonnière des colonnes troposphériques de dioxyde d'azote (NO₂) et de monoxyde de carbone (CO) entre 2019 et 2023 à partir des données satellitaires Sentinel-5P/TROPOMI. Les produits de niveau 2 (L2) TROPOMI relatifs aux colonnes troposphériques de NO₂ et aux colonnes totales de CO ont d'abord été extraits de la plateforme Copernicus Data Space Ecosystem. Ensuite, ils ont été prétraités sous Google Earth Engine selon des critères de qualité (indice de qualité > 0,75 pour le NO₂ ; > 0,5 pour le CO ; fraction nuageuse < 0,5). Enfin, les données ont été interpolées par la méthode IDW et intégrées dans un WebSIG interactif pour la visualisation spatio-temporelle. Sur la période 2019–2023, les colonnes de NO₂ varient entre $4,39 \times 10^{-5}$ et $6,73 \times 10^{-5}$ mol/m², tandis que celles du CO oscillent entre $4,31 \times 10^{-2}$ et $4,92 \times 10^{-2}$ mol/m². Les valeurs maximales sont enregistrées durant la grande saison sèche, dans les communes centrales fortement urbanisées

(Plateau, Adjamé, Yopougon, Cocody, Marcory), correspondant aux principaux pôles d'activité économique et aux axes de circulation dense. L'intégration des résultats dans un WebSIG interactif et accessible au public constitue une innovation majeure, car elle facilite l'exploration des variations spatio-temporelles et sensibilise la population aux enjeux de qualité de l'air. Cette approche offre une alternative fiable et peu coûteuse aux réseaux classiques, tout en fournissant un outil précieux pour guider les politiques publiques et réduire les risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique à Abidjan.

Mots-clés: Pollution urbaine, télédétection, WebSIG, santé publique, NO₂, CO, Sentinel-5P/TROPOMI, colonne troposphérique, surveillance de la qualité de l'air, Abidjan

Seasonal Dynamics of Nitrogen Dioxide (NO₂) and Carbon Monoxide (CO) in the District of Abidjan: Analysis Using Remote Sensing and WebGIS

Koffi Djaha Levix Nadir
N'Guessan Bi Vami Hermann
Konan Kouadio Justin

Université Felix Houphouët Boigny (UFHB), Côte d'Ivoire
Centre Universitaire de Recherche et d'Application
en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

Abstract

Abidjan, the economic capital of Côte d'Ivoire, is undergoing rapid urbanization, which is contributing to an increase in atmospheric emissions, even though the city does not have effective air pollutant monitoring networks. This study analyzes the seasonal dynamics of tropospheric columns of nitrogen dioxide (NO₂) and carbon monoxide (CO) between 2019 and 2023 using Sentinel-5P/TROPOMI satellite data. TROPOMI Level 2 (L2) products for tropospheric NO₂ columns and total CO columns were first extracted from the Copernicus Data Space Ecosystem platform. They were then pre-processed in Google Earth Engine according to quality criteria (quality index > 0.75 for NO₂; > 0.5 for CO; cloud fraction < 0.5). Finally, the data were interpolated using the IDW method and integrated into an interactive WebGIS for spatiotemporal visualization. Over the period 2019–2023, NO₂ columns vary between 4.39×10^{-5} and 6.73×10^{-5} mol/m², while CO columns range from 4.31×10^{-2} to 4.92×10^{-2} mol/m². The maximum values are recorded

during the dry season in the heavily urbanized central municipalities (Plateau, Adjamé, Yopougon, Cocody, Marcory), which are the main centers of economic activity and heavy traffic. The integration of the results into an interactive WebGIS is a major innovation, as it facilitates the exploration of spatio-temporal variations and raises public awareness of air quality issues. This approach offers a reliable and inexpensive alternative to conventional networks, while providing a valuable tool for guiding public policy and reducing the health risks associated with air pollution in Abidjan.

Keywords: Urban pollution, remote sensing, WebGIS, public health, NO₂, CO, Sentinel-5P/TROPOMI, tropospheric column, air quality monitoring, Abidjan

Introduction

Le processus accéléré d'urbanisation et d'industrialisation dans le monde a entraîné une augmentation des émissions de polluants atmosphériques, avec des conséquences néfastes pour la santé humaine, l'économie et l'environnement (Yang & Liu, 2018). Les pays en développement, notamment l'Afrique et l'Asie, sont disproportionnellement touchés par cette pollution (HEI, 2019). En Afrique subsaharienne, la pollution de l'air extérieur serait responsable de milliers de décès prématurés annuels (OMS, 2008), un fardeau sanitaire comparable à celui des maladies infectieuses majeures (Landrigan et al., 2018).

Face à cette urgence, la surveillance de la qualité de l'air est devenue un impératif. Cependant, dans de nombreux pays africains, cette surveillance est entravée par le coût élevé et la maintenance complexe des stations de mesure fixes (Ma et al., 2020).

La télédétection apparaît ainsi comme un outil complémentaire essentiel, permettant une couverture spatiale étendue et continue pour le suivi des polluants atmosphériques (N'Guessan Bi et al., 2021). Elle constitue donc une alternative prometteuse pour lever les contraintes d'observation continue de la terre et de l'atmosphère. Des études menées dans diverses villes africaines ont déjà démontré le potentiel de l'imagerie satellitaire pour surveiller la dynamique du NO₂ et du CO, que ce soit à Accra, au Caire, ou encore à Enugu (Ejikeme et al., 2023; Sameh et al., 2023; Wang et al., 2022). Les observations satellitaires issues de Sentinel-5P/TROPOMI ont démontré une bonne performance pour l'estimation des colonnes troposphériques de NO₂ et de CO, avec des corrélations élevées ($r \approx 0,75-0,85$) par rapport aux mesures in situ et un biais moyen inférieur à 10% (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). Plusieurs travaux confirment que ces données offrent une couverture spatiale fiable et continue, comblant ainsi les lacunes des réseaux de surveillance classiques, notamment en Afrique (Bahino et al.,

2018). Toutefois, l'utilisation de données satellitaires en contexte tropical humide présente des défis spécifiques : la couverture nuageuse fréquente réduit la disponibilité temporelle des données, la sensibilité verticale des mesures satellitaires peut varier selon la hauteur de la couche limite atmosphérique (typiquement entre 500 m et 2 km sous les tropiques), et les colonnes atmosphériques intègrent la pollution sur toute la colonne troposphérique, rendant nécessaire l'utilisation de modèles de transport chimique ou de données météorologiques pour estimer les concentrations de surface auxquelles les populations sont exposées.

Pour les villes côtières d'Afrique de l'Ouest, les connaissances sur la pollution atmosphérique demeurent encore fragmentaires et hétérogènes. Si certaines études ont documenté les niveaux de polluants gazeux dans des capitales telles qu'Accra ou Cotonou (Bahino et al., 2018; Wang et al., 2022), plusieurs incertitudes persistent. Premièrement, la représentativité des mesures satellitaires en atmosphère tropicale humide reste discutée, en raison de la forte couverture nuageuse et des variations saisonnières de la hauteur de la couche limite atmosphérique, susceptibles d'affecter la qualité des récupérations. Deuxièmement, il n'existe pas de méthodes universellement validées permettant de convertir de manière robuste les colonnes troposphériques satellitaires en concentrations de surface directement exploitables pour l'évaluation de l'exposition sanitaire. Troisièmement, l'absence de données de mesure in situ disponibles localement limite la possibilité de réaliser des validations indépendantes des produits satellitaires. Ces lacunes sont particulièrement marquées à Abidjan, où, malgré une croissance urbaine rapide et une intensification des activités économiques, aucune étude systématique récente portant sur la dynamique des polluants gazeux (NO_2 , CO) n'a été menée à l'échelle urbaine.

Le District Autonome d'Abidjan, principal pôle économique de la Côte d'Ivoire, est un cadre d'étude pertinent. Si des travaux ont commencé à documenter la pollution particulaire (PM) via la télédétection (N'Guessan Bi et al., 2021) ou utilisé des bioindicateurs (Tra Bi, 2020), les études sur les polluants gazeux (NO_2 , CO) et leur variabilité temporelle restent rares. Une analyse fine de leur dynamique saisonnière, définie ici comme les variations systématiques des colonnes atmosphériques entre les quatre saisons climatiques d'Abidjan (grande saison sèche, petite saison sèche, grande saison des pluies, petite saison des pluies), et influencée par le régime des moussons, fait encore défaut.

Le choix du NO_2 et du CO se justifie par leur représentativité des principales sources urbaines d'émissions à Abidjan. Le NO_2 constitue un indicateur robuste du trafic routier et des activités industrielles, tandis que le CO est un traceur des combustions incomplètes liées aux transports et aux usages domestiques. De plus, ces deux polluants sont mesurés

quotidiennement par Sentinel-5P/TROPOMI avec une résolution spatiale adaptée au suivi urbain. Leur analyse conjointe permet ainsi de mieux caractériser la signature anthropique de la pollution atmosphérique dans un contexte d'urbanisation rapide.

Pour répondre à ce manque de connaissances, cette étude se propose d'analyser la dynamique saisonnière des principaux polluants gazeux à Abidjan sur la période 2019-2023. Notre approche combine l'exploitation de données satellitaires récentes (Sentinel-5P) et le développement d'un Système d'Information Géographique accessible via le web (WebSIG). L'objectif général est de mettre en place une plateforme WebSIG de visualisation et d'analyse des polluants atmosphériques à Abidjan afin de caractériser leurs variations saisonnières.

Cette étude cherche à répondre aux questions suivantes :

- Comment les colonnes troposphériques de NO₂ et CO varient-elles selon les saisons à Abidjan ?
- Où se situent les points chauds de pollution persistants et quelles zones présentent les niveaux les plus élevés durant la saison sèche ?
- Quelle est l'ampleur de la variabilité interannuelle et saisonnière de ces polluants entre 2019 et 2023 ?

Les objectifs spécifiques sont :

- Estimer et cartographier les colonnes troposphériques de NO₂ et CO sur des bases annuelles et saisonnières.
- Analyser statistiquement l'évolution saisonnière de ces colonnes atmosphériques.
- Concevoir et mettre en ligne une plateforme WebSIG interactive pour la diffusion et l'exploration des résultats.

Analyse et traitement des données

Présentation de la zone d'étude

Le District Autonome d'Abidjan (DAA), créé par le décret n°2011-263 du 28 septembre 2011, est situé sur le littoral sud de la Côte d'Ivoire, entre 5°10' et 5°40' de latitude Nord et 4°30' et 4°60' de longitude Ouest (Figure 1). Il couvre une superficie de 2 034 km² et englobe la ville d'Abidjan, capitale économique du pays, ainsi que quatre sous-préfectures (Anyama, Bingerville, Brofodoumé et Songon) et dix communes (Abobo, Adjamé, Attécoubé, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville et Yopougon). Le climat d'Abidjan est de type équatorial humide, caractérisé par une alternance de quatre saisons principales (Traore, 2016): la grande saison des pluies (avril–juillet), la petite saison sèche (juillet–septembre), la petite saison des pluies (septembre–novembre) et la grande saison sèche (décembre–mars).

Les précipitations annuelles dépassent 1 500 mm, avec des maxima mensuels pouvant atteindre 350 mm, tandis que les températures oscillent généralement entre 24 et 32 °C (Tra Bi, 2020). En saison humide, les vents du sud apportent de l'air saturé en humidité depuis le golfe de Guinée, favorisant la formation de systèmes orageux (lignes de grains) responsables de pluies intenses et du transport de particules fines depuis l'Afrique australe. En saison sèche, les vents du nord dominant, amenant des poussières sahariennes (Harmattan) et des particules issues de la combustion de biomasse, contribuant à la dégradation de la qualité de l'air.

Dans le DAA, la végétation originelle est fortement réduite par l'urbanisation et l'expansion des infrastructures. Des espaces protégés tels que la forêt du Banco subsiste, mais sont soumis à des pressions anthropiques croissantes (exploitation illicite du bois, extension urbaine, pollution). Cette dégradation de l'environnement limite le rôle de la végétation dans la régulation des polluants atmosphériques.

Avec une population estimée à 6,32 millions d'habitants en 2021, le District Autonome d'Abidjan concentre près de 20 % de la population nationale et plus de 40 % du PIB de la Côte d'Ivoire, ce qui en fait le principal pôle économique du pays. Il abrite plus de 60 % du tissu industriel national (Sako et al., 2013), ainsi que le Port Autonome d'Abidjan (PAA), infrastructure stratégique pour le commerce sous-régional.

Le DAA possède un réseau routier dense et une circulation automobile intense, dominée par l'usage de carburants Diesel à forte teneur en soufre (5 000 ppm), contrastant avec les normes internationales (< 50 ppm). Cette dépendance énergétique, combinée à la forte croissance démographique et à la concentration des industries, contribue largement aux émissions de NO₂ et CO, renforçant la problématique de pollution atmosphérique.

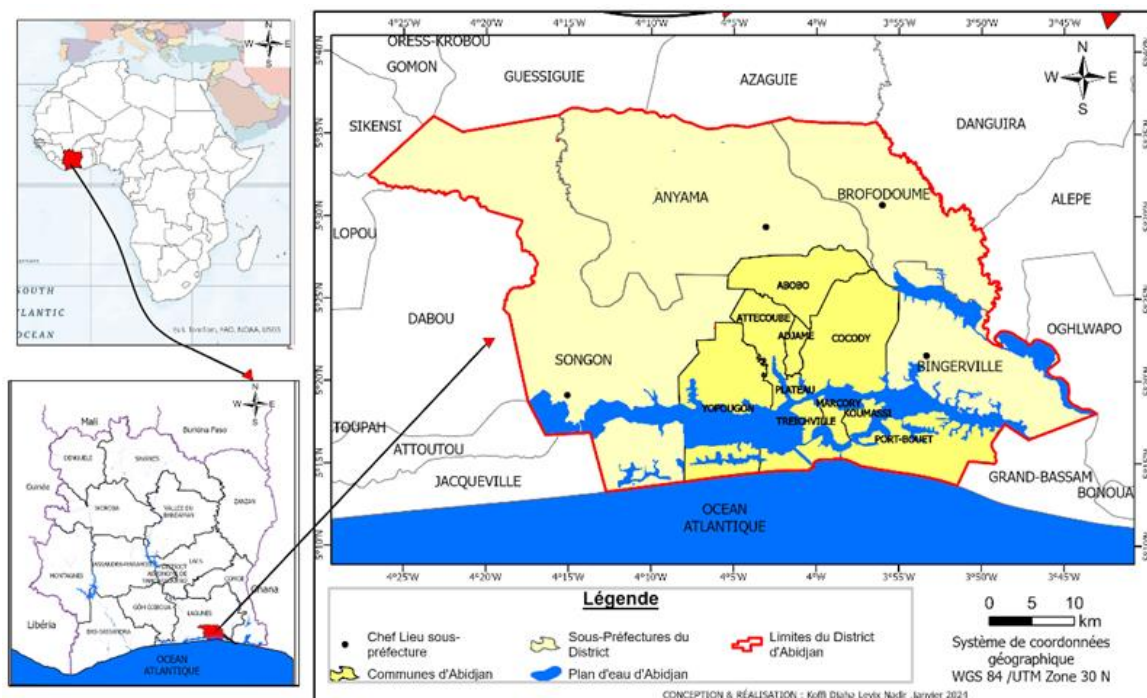


Figure 1 : Situation géographique du District Autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

Données utilisées

Cette étude s'appuie sur des données satellitaires issues du satellite Sentinel-5P, lancé le 13 octobre 2017 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus. Équipé de l'instrument TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), Sentinel-5P est conçu pour la surveillance mondiale de la composition atmosphérique, offrant des mesures quotidiennes de polluants atmosphériques tels que le dioxyde d'azote (NO_2) et le monoxyde de carbone (CO) avec une résolution spatiale de $7 \times 7 \text{ km}^2$ pour le NO_2 et de $7 \times 5.5 \text{ km}^2$ pour le CO depuis 2018 (Veefkind et al., 2012). TROPOMI, un spectromètre à rétrodiffusion solaire, opère dans plusieurs bandes spectrales : ultraviolet-visible (270–500 nm) pour le NO_2 et infrarouge à ondes courtes (2 310–2 385 nm) pour le CO , ce qui permet une détection précise des colonnes troposphériques totales de ces polluants (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). Ces caractéristiques offrent une amélioration significative par rapport aux instruments précédents comme OMI (Ozone Monitoring Instrument), avec une précision validée par des corrélations élevées ($r \approx 0,75\text{--}0,85$) et un biais moyen inférieur à 10 % par rapport aux mesures in situ (Ialongo et al., 2020).

Les données utilisées dans cette étude, extraites de la plateforme Copernicus Data Space Ecosystem (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>), sont des produits de niveau 2 (L2) pour le NO_2 (colonnes troposphériques

totales, exprimées en mol/m^2) et le CO (colonnes totales, exprimées en mol/m^2). Elles couvrent le District Autonome d'Abidjan (DAA) sur la période 2019–2023. Cette période a été choisie afin de capturer les variations saisonnières associées au climat subéquatorial de type attéen qui caractérise Abidjan, marqué par un régime pluviométrique bimodal sous l'influence de la mousson ouest-africaine, avec deux saisons sèches (décembre–mars et juillet–septembre) et deux saisons des pluies (avril–juillet et octobre–novembre). Elle permet également d'intégrer la phase post-Covid, susceptible d'avoir influencé les niveaux d'émissions liés aux activités anthropiques telles que le trafic routier et les activités industrielles (Bahino et al., 2018). Les données Sentinel-5P, accessibles librement, compensent l'absence de réseaux de surveillance au sol dans le DAA, permettant une analyse spatio-temporelle détaillée des concentrations de NO_2 et de CO dans un contexte urbain en rapide développement. Pour assurer la qualité des données, les produits L2 ont été filtrés en fonction des critères de qualité fournis par l'ESA, notamment en excluant les observations affectées par une couverture nuageuse élevée (fraction nuageuse $> 0,5$) ou des erreurs de mesure (indice de qualité $< 0,75$ pour le NO_2 et $< 0,5$ pour le CO). Les données ont été agrégées mensuellement pour analyser les variations saisonnières et spatiales des deux polluants, en tenant compte des influences climatiques (vents, précipitations) et des sources anthropogéniques (trafic, industries) décrites dans la section « Zone d'étude ». Le tableau 1 résume les caractéristiques principales des données NO_2 et CO utilisées dans cette étude.

Tableau 1 : Récapitulatif des données satellitaires NO_2 et CO utilisées

Paramètre	NO_2	CO
Instrument	TROPOMI / Sentinel-5P	TROPOMI / Sentinel-5P
Produit	Colonne troposphérique (L2)	Colonne totale (L2)
Résolution spatiale	$7 \times 7 \text{ km}^2$	$7 \times 5,5 \text{ km}^2$
Résolution temporelle	Quotidienne	Quotidienne
Période	2019–2023	2019–2023
Unité	mol/m^2	mol/m^2
Source	Copernicus Data Space Ecosystem	Copernicus Data Space Ecosystem
Critères de qualité	Fraction nuageuse $< 0,5$; QA $> 0,75$	Fraction nuageuse $< 0,5$; QA $> 0,5$

Méthodes de traitements des données

L'analyse de la dynamique saisonnière des colonnes troposphériques de dioxyde d'azote (NO_2) et de monoxyde de carbone (CO) dans le District Autonome d'Abidjan (DAA) repose sur une méthodologie intégrant la télédétection, le traitement cartographique, l'analyse statistique, et le développement d'un système d'information géographique en ligne (WebSIG) interactif. La Figure 2 présente l'organigramme méthodologique structurant

cette approche en quatre étapes principales : l'acquisition des données satellitaires Sentinel-5P pour le NO₂ et le CO, le prétraitement des données via Google Earth Engine avec filtrage qualité et agrégation saisonnière, l'interpolation spatiale IDW et l'analyse statistique des variations temporelles, puis le développement du WebSIG pour la visualisation interactive et la diffusion des résultats auprès des utilisateurs. Cette méthodologie permet de cartographier et d'analyser les variations spatio-temporelles des deux polluants sur la période 2019-2023.

Prétraitement des données satellitaires

Les colonnes troposphériques de NO₂ sont extraites à partir de la bande spectrale ultraviolet-visible (270–500 nm) de TROPOMI, tandis que les colonnes de CO proviennent de la bande infrarouge à ondes courtes (2310–2385 nm). L'extraction des valeurs a été réalisée pixel par pixel pour chaque scène quotidienne sur la période 2019–2023 via l'interface de programmation (API) de Google Earth Engine (GEE), une plateforme cloud permettant un traitement efficace de grandes quantités de données géospatiales (Gorelick et al., 2017). La fonction *ee.ImageCollection()* a été utilisée pour charger les collections Sentinel-5P, et la fonction *reduceRegion()* pour agréger les valeurs sur la zone d'étude.

Dans GEE, les bandes ont été filtrées selon trois critères de qualité. Premièrement, seules les observations présentant une fraction nuageuse inférieure à 0,5 ont été conservées pour garantir la fiabilité des mesures. Deuxièmement, un indice de qualité supérieur à 0,75 pour le NO₂ et supérieur à 0,5 pour le CO a été appliqué, conformément aux recommandations de l'ESA pour l'utilisation des produits TROPOMI de niveau 2. Troisièmement, les bandes ont été découpées géographiquement pour couvrir exclusivement le District Autonome d'Abidjan.

Les données ont été agrégées mensuellement puis regroupées en quatre saisons climatiques propres à Abidjan : la grande saison sèche (décembre–mars), la petite saison sèche (juillet–septembre), la grande saison des pluies (avril–juillet), et la petite saison des pluies (octobre–novembre) (Traore, 2016). Les moyennes saisonnières ont été calculées en faisant la moyenne arithmétique des colonnes quotidiennes valides pour chaque saison. Les moyennes annuelles correspondent à la moyenne des quatre moyennes saisonnières. Ces calculs ont été réalisés pour chaque pixel de la grille TROPOMI.

Interpolation spatiale

Les produits Sentinel-5P/TROPOMI utilisés dans cette étude présentent une résolution spatiale native d'environ 7 × 3,5 km. Une interpolation par Distance Inverse Pondérée (IDW) a été réalisée sous ArcGIS

Pro pour obtenir une représentation spatiale continue des concentrations à l'échelle intra-urbaine et améliorer la lisibilité cartographique dans le WebSIG. Le choix de la méthode IDW repose sur sa simplicité d'implémentation et sa robustesse pour la représentation continue de phénomènes environnementaux lorsque la densité des points d'observation est relativement faible. Contrairement aux méthodes géostatistiques telles que le krigeage, l'IDW ne nécessite pas l'estimation d'un variogramme ni l'hypothèse de stationnarité spatiale, ce qui la rend adaptée aux colonnes satellitaires à large pixel comme celles de TROPOMI. Cette approche permet ainsi de produire une surface interpolée cohérente pour des fins de visualisation cartographique, tout en conservant la structure spatiale générale des données.

La méthode IDW, proposée par Shepard (1968), repose sur le principe selon lequel l'influence d'un point diminue avec la distance. L'expression mathématique de l'estimateur IDW est donnée ci-dessous :

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Où $Z(x)$ est la valeur estimée au point x , Z_i est la valeur observée au point i , d_i est la distance entre le point estimé et le point i , et p est le paramètre de puissance fixé à 2 dans cette étude.

Il est important de souligner que cette opération constitue un lissage cartographique et non une véritable amélioration de la résolution spatiale. L'interpolation à 100 m ne crée aucune information supplémentaire au-delà de la résolution native du capteur et peut introduire une précision apparente artificielle. Par conséquent, les cartes interpolées doivent être interprétées uniquement comme des supports de visualisation des tendances générales.

Toutes les analyses statistiques, les moyennes saisonnières et les conclusions quantitatives présentées dans cette étude ont été réalisées à partir des données à la résolution native de TROPOMI (~7 km). Les incertitudes associées à la réduction d'échelle cartographique, notamment le lissage des gradients abrupts et la non-prise en compte des hétérogénéités fines liées à la structure urbaine, sont reconnues comme une limitation méthodologique importante (Mejía C. et al., 2023).

Analyse statistique

Les statistiques descriptives (minimum, maximum, moyenne) ont été extraites de chaque carte interpolée à l'aide d'ArcGIS Pro, puis exportées dans le tableur Excel. Les données ont été organisées par polluant (NO_2 , CO), par saison et par année (2019-2023) pour extraire les moyennes saisonnières

présentées dans le Tableau 2. Des graphiques d'évolution temporelle ont été générés pour visualiser les variations annuelles (Figure 6) et saisonnières (Figures 4 et 5) des colonnes atmosphériques.

Développement du WebSIG

Un WebSIG interactif a été développé afin d'assurer la diffusion et l'exploration des variations spatio-temporelles des colonnes de NO₂ et de CO. Le modèle conceptuel du système repose sur une architecture en trois niveaux fonctionnels : une couche de données, une couche de traitement et une couche de visualisation.

La couche de données comprend le stockage des rasters interpolés et des séries statistiques dans une base PostgreSQL avec extension PostGIS, permettant la gestion des informations géospatiales. La couche de traitement assure la conversion et l'optimisation des données issues d'ArcGIS Pro, exportées au format GeoTIFF puis converties en GeoJSON via QGIS pour leur intégration web. Enfin, la couche de visualisation repose sur une interface développée en HTML, CSS et JavaScript, utilisant la bibliothèque Leaflet.js pour l'affichage cartographique interactif et D3.js pour la génération dynamique des graphiques.

Le flux opérationnel du système s'organise comme suit : les données prétraitées sont intégrées dans la base géospatiale, optimisées pour le web, puis rendues accessibles via une interface permettant à l'utilisateur de sélectionner le polluant, la période et l'année d'intérêt. Les requêtes effectuées par l'utilisateur déclenchent l'affichage des cartes correspondantes et des indicateurs statistiques associés. La plateforme est accessible publiquement à l'adresse https://nadir02.github.io/polluant_NO2/. Les scripts de prétraitement et les flux de traitement cartographique sont disponibles sur demande raisonnable afin de garantir la reproductibilité scientifique.

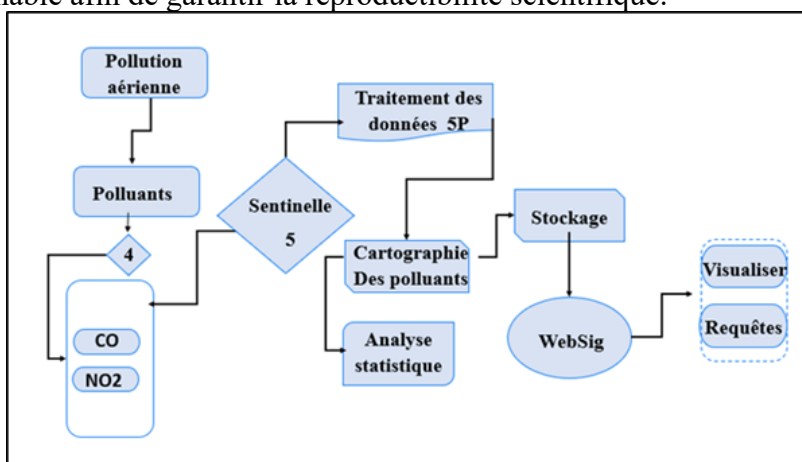


Figure 2 : Organigramme méthodologique pour étudier la variation saisonnière et la répartition spatiale des polluants atmosphériques dans le district d'Abidjan

Résultats

Les valeurs présentées dans cette section correspondent à des **colonnes troposphériques** (exprimées en mol/m^2 pour le NO_2 et le CO), c'est-à-dire des quantités intégrées verticalement sur l'ensemble de la troposphère. Elles ne représentent pas des concentrations mesurées au niveau du sol.

Répartition spatiale du NO_2 et du CO dans le District d'Abidjan entre 2019 et 2023

Analyse annuelle

La Figure 3 présente la distribution spatiale annuelle des colonnes troposphériques de NO_2 et de CO dans le District d'Abidjan entre 2019 et 2023. Les cartes ont pour objectif principal de mettre en évidence l'organisation spatiale relative des concentrations, en distinguant les zones à faible, moyenne et forte intensité à l'échelle intra-urbaine. Elles permettent ainsi d'identifier visuellement les secteurs présentant des concentrations élevées, sans viser une lecture quantitative détaillée des valeurs numériques. Les deux polluants présentent une structuration spatiale comparable, caractérisée par des niveaux plus élevés dans les communes centrales fortement urbanisées telles que le Plateau, Adjamé, Treichville, Marcory, Cocody et Yopougon. Ces zones correspondent aux principaux pôles d'activités économiques et aux axes de circulation les plus denses, suggérant l'influence dominante des émissions liées au trafic routier et aux activités industrielles.

Sur l'ensemble de la période étudiée, la configuration spatiale demeure relativement stable, avec la persistance de points chauds localisés au cœur de l'agglomération. Cette stabilité traduit une structuration durable des pressions anthropiques dans le district. Les variations interannuelles observées restent modérées et ne modifient pas l'organisation spatiale générale.

Les valeurs maximales et minimales associées à ces distributions sont présentées et analysées dans la section statistique (Figure 6), où les concentrations moyennes annuelles sont quantifiées de manière précise.

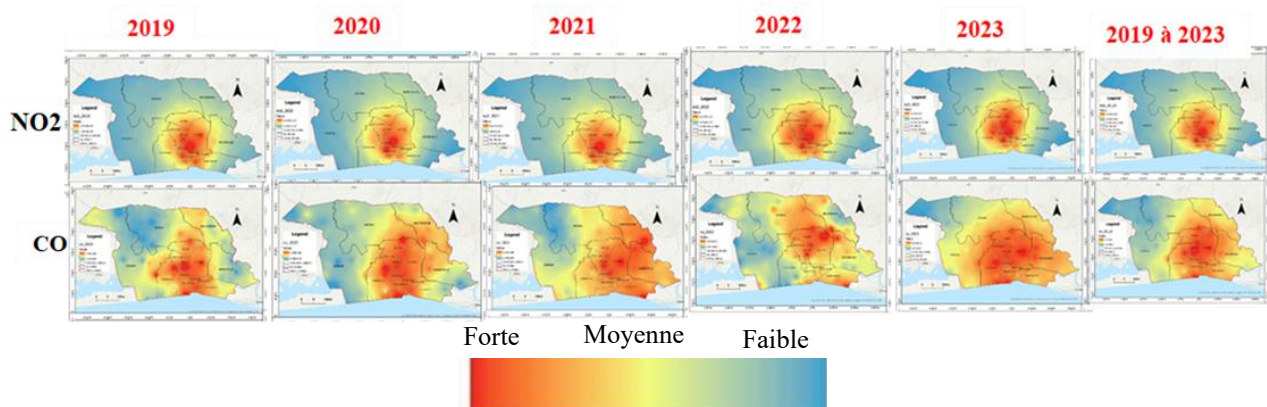


Figure 3: Cartes de la moyenne annuelle du NO₂ et du CO sur le District d'Abidjan allant de 2019 à 2023

Analyse saisonnière

Les Figures 4 et 5 présentent la distribution spatiale saisonnière des colonnes troposphériques de CO et de NO₂ entre 2019 et 2023. Les cartes ont pour objectif principal de mettre en évidence la structuration spatiale relative des concentrations, en distinguant visuellement les zones à faible, moyenne et forte intensité. Les valeurs numériques détaillées des maxima et minima saisonniers sont présentées dans le Tableau 2 et dans la section statistique correspondante.

Pour le CO, les valeurs maximales saisonnières sont observées durant les saisons sèches, notamment la grande saison sèche (GSS) et la petite saison sèche (PSS), avec une intensification notable en 2020 et 2021. Spatialement, ces concentrations élevées se localisent principalement dans les secteurs Nord-Est et Sud-Ouest du district ainsi que dans certaines zones périphériques. À l'inverse, les valeurs minimales apparaissent majoritairement durant les saisons pluvieuses, c'est-à-dire la grande saison des pluies (GSP) et la petite saison des pluies (PSP), où la distribution des concentrations devient plus homogène sur l'ensemble du territoire. Cette organisation spatiale traduit l'influence combinée des conditions météorologiques saisonnières et des sources locales de combustion.

Concernant le NO₂, les concentrations les plus élevées se concentrent de manière récurrente dans les communes centrales fortement urbanisées telles que le Plateau, Adjamé, Treichville, Marcory et Yopougon, indépendamment de la saison considérée. Les valeurs minimales sont observées en périphérie du district et dans les zones moins densément urbanisées, particulièrement durant la GSP et la PSP. Contrairement au CO, la variabilité saisonnière du NO₂ reste modérée et la structure spatiale demeure globalement stable d'une saison à l'autre, suggérant une prédominance de sources anthropiques continues liées au trafic routier et aux activités industrielles.

Ainsi, les cartes permettent d'identifier les zones d'accumulation relative des polluants selon les saisons (GSS, PSS, GSP, PSP), tandis que la quantification précise des concentrations saisonnières est assurée par l'analyse statistique présentée dans le Tableau 2.

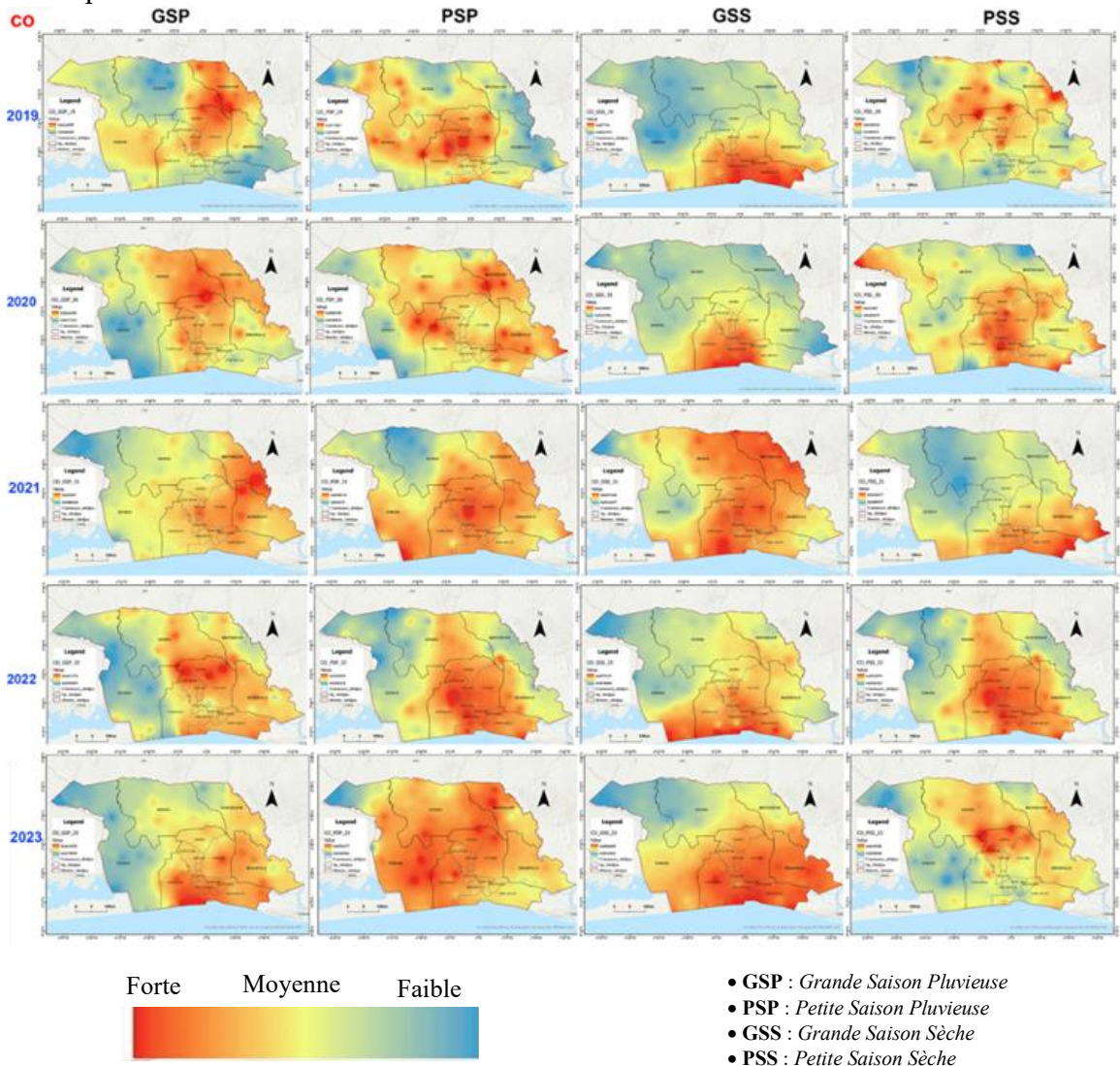


Figure 4 : Cartes de la moyenne saisonnière du CO sur le District d'Abidjan de 2019 à 2023

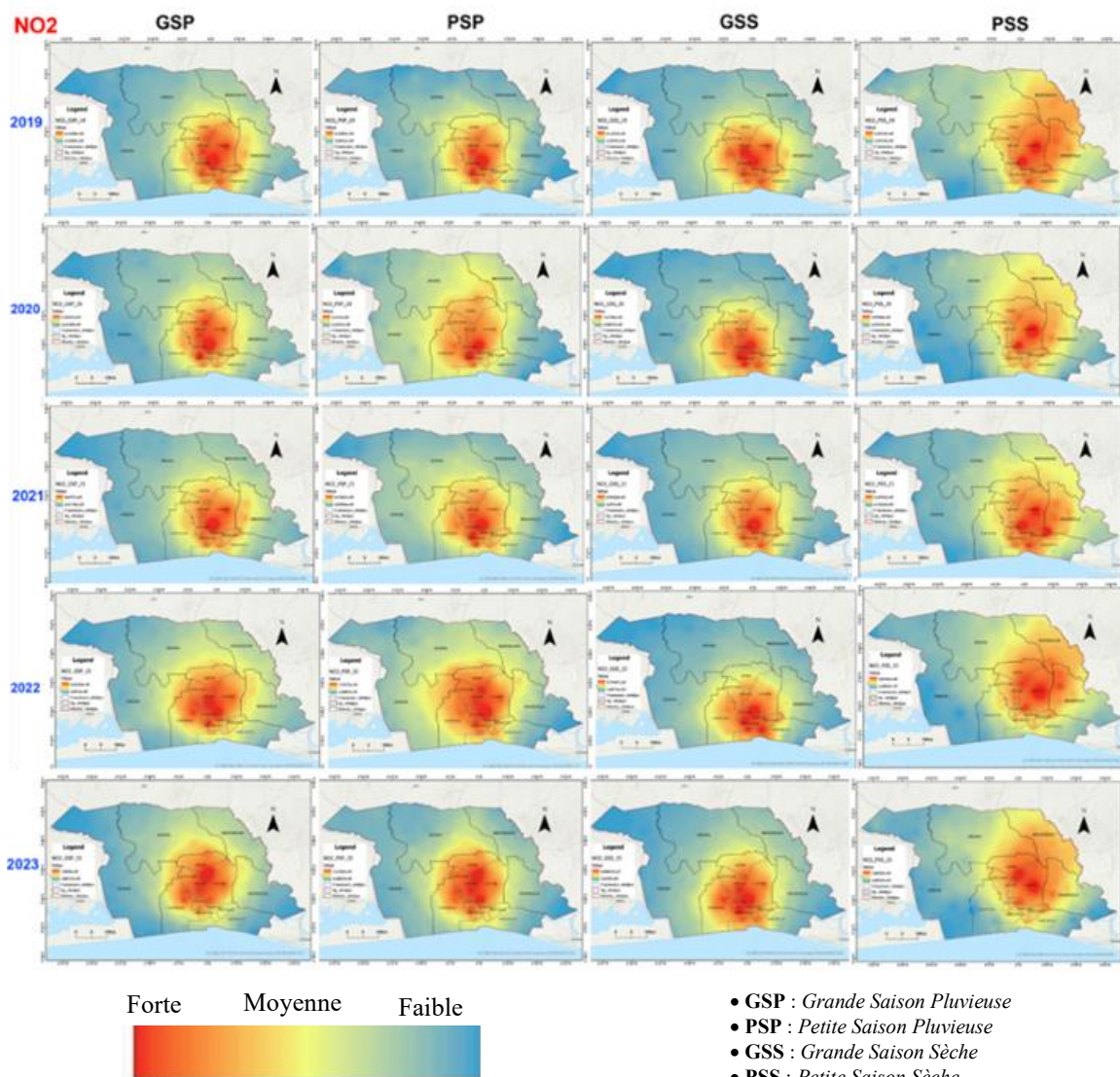


Figure 5 : Cartes de la moyenne saisonnière du NO₂ sur le District d'Abidjan de 2019 à 2023

Analyse statistiques de l'évolution des concentrations des principaux polluants atmosphériques

Statistiques annuelles

La Figure 6 présente l'évolution des moyennes annuelles des colonnes troposphériques de CO et de NO₂ dans le district d'Abidjan entre 2019 et 2023 (mol/m²). Les colonnes de CO demeurent relativement stables sur la période étudiée, avec des valeurs comprises entre $4,31 \times 10^{-2}$ et $4,92 \times 10^{-2}$ mol/m². Un maximum est observé en 2020 ($4,80 \times 10^{-2}$ mol/m²), suivi d'une

diminution progressive jusqu'en 2023, où les niveaux redeviennent proches de ceux de 2019. Cette dynamique suggère une sensibilité du CO aux variations conjoncturelles des activités anthropiques.

Les colonnes de NO₂ présentent une évolution distincte. Les moyennes annuelles varient entre $4,39 \times 10^{-5}$ et $6,01 \times 10^{-5}$ mol/m², avec une tendance à la hausse de 2019 à 2021, suivie d'une phase de stabilisation entre 2022 et 2023. Contrairement au CO, le NO₂ semble refléter une pression d'émission plus structurelle et persistante.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence deux dynamiques contrastées : une variabilité plus marquée du CO à court terme et une évolution plus progressive du NO₂, traduisant des comportements d'émission différenciés au sein du district.

Les incertitudes associées à ces estimations incluent le bruit inhérent aux produits TROPOMI, les pertes de données liées au filtrage de qualité (QA) et à la couverture nuageuse, ainsi que les limites liées à l'interpolation cartographique. Les analyses quantitatives présentées reposent exclusivement sur les données à la résolution native (~7 km).

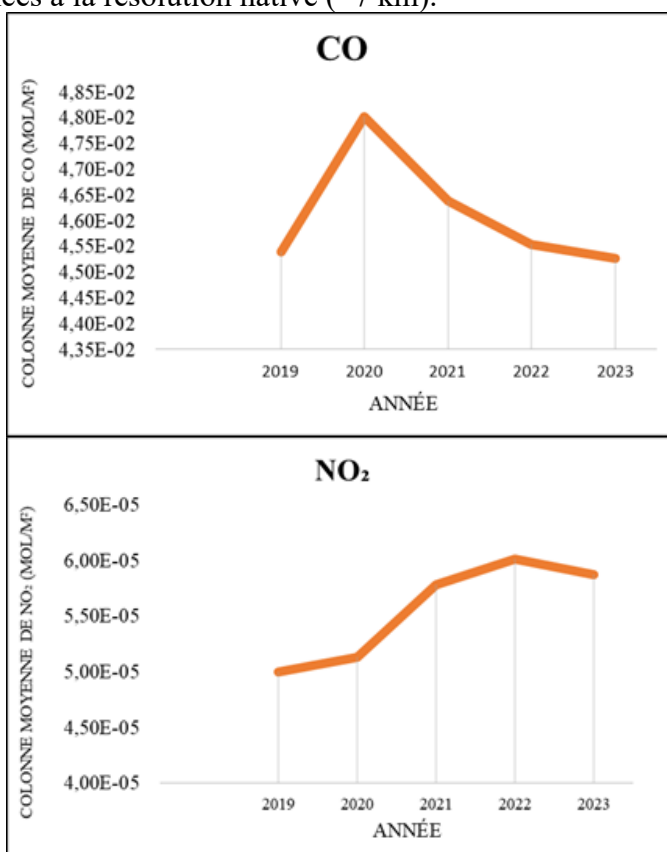


Figure 6 : Évolution des émissions annuelles moyennes du NO₂ et CO dans le district d'Abidjan (2019-2023)

Statistiques saisonnières

Le Tableau 2 présente les moyennes saisonnières des colonnes troposphériques de NO₂ et de CO dans le District Autonome d'Abidjan pour la période 2019–2023, permettant d'évaluer la variabilité intra-annuelle des deux polluants.

Pour le NO₂, une saisonnalité nette est observée. Les colonnes sont systématiquement plus élevées durant les saisons sèches, en particulier la grande saison sèche, avec un maximum de $6,73 \times 10^{-5}$ mol/m² enregistré en 2022. Les saisons pluvieuses présentent des niveaux plus faibles, traduisant l'effet des précipitations et d'une dispersion atmosphérique plus efficace. Cette récurrence saisonnière confirme l'influence combinée des conditions météorologiques et des émissions anthropiques urbaines.

Le CO présente une dynamique similaire, avec des colonnes plus élevées en saison sèche et un pic de $5,85 \times 10^{-2}$ mol/m² observé en 2020. Les saisons pluvieuses enregistrent des valeurs plus modérées. Toutefois, la variabilité interannuelle du CO apparaît moins marquée que celle du NO₂, suggérant une relative stabilité des sources d'émission au cours de la période étudiée.

Il convient de rappeler que ces valeurs correspondent à des colonnes troposphériques intégrées verticalement. Elles ne représentent pas des concentrations au niveau du sol et ne peuvent donc être directement comparées aux lignes directrices sanitaires fondées sur des concentrations de surface.

Tableau 2 : Moyennes saisonnières des colonnes de dioxyde d'azote (NO₂) et de monoxyde de carbone (CO) dans le District Autonome d'Abidjan (2019–2023)

Année	Saison	Dioxyde d'azote (NO ₂) (mol/m ²)	Monoxyde de carbone (CO) (mol/m ²)
2019	Grande saison pluvieuse	$4,89 \times 10^{-5}$	0,0415403
	Petite saison pluvieuse	$4,52 \times 10^{-5}$	0,0369756
	Grande saison sèche	$5,95 \times 10^{-5}$	0,0557309
	Petite saison sèche	$4,36 \times 10^{-5}$	0,0416646
2020	Grande saison pluvieuse	$5,08 \times 10^{-5}$	0,04328494
	Petite saison pluvieuse	$5,01 \times 10^{-5}$	0,03980554
	Grande saison sèche	$5,32 \times 10^{-5}$	0,0585206
	Petite saison sèche	$4,82 \times 10^{-5}$	0,04158175
2021	Grande saison pluvieuse	$5,46 \times 10^{-5}$	0,04148918
	Petite saison pluvieuse	$6,25 \times 10^{-5}$	0,03840881
	Grande saison sèche	$5,80 \times 10^{-5}$	0,05574351
	Petite saison sèche	$5,38 \times 10^{-5}$	0,04185186
2022	Grande saison pluvieuse	$6,06 \times 10^{-5}$	0,0402828
	Petite saison pluvieuse	$5,75 \times 10^{-5}$	0,03796473
	Grande saison sèche	$6,73 \times 10^{-5}$	0,05559
	Petite saison sèche	$4,95 \times 10^{-5}$	0,03796473
2023	Grande saison pluvieuse	$5,81 \times 10^{-5}$	0,0395666
	Petite saison pluvieuse	$5,42 \times 10^{-5}$	0,0383739
	Grande saison sèche	$6,54 \times 10^{-5}$	0,05430458
	Petite saison sèche	$5,09 \times 10^{-5}$	0,04203889

Source : Auteurs, à partir des données Sentinel-5P/TROPOMI

Plateforme WebSIG

Une plateforme WebSIG interactive a été développée pour permettre la visualisation et l'exploration des colonnes troposphériques de NO₂ et de CO dans le District Autonome d'Abidjan sur la période 2019–2023. L'application est accessible à l'adresse suivante : https://nadir02.github.io/polluant_NO2/.

L'interface permet de sélectionner le polluant, l'année et la saison via un menu dynamique. Les cartes sont affichées à partir des données traitées et représentées selon un dégradé de couleurs continu (valeurs faibles à élevées), facilitant l'identification visuelle des gradients spatiaux. Des graphiques interactifs (diagrammes en barres et séries temporelles) synthétisent les moyennes annuelles et saisonnières présentées dans les sections précédentes. La plateforme constitue une interface de restitution des résultats obtenus, facilitant leur exploration spatiale et temporelle. Elle sert de support de diffusion scientifique, sans modification des données issues de la résolution native du capteur.

Discussion

L'utilisation des données Sentinel-5P/TROPOMI (résolution d'environ 7 km) constitue une approche adaptée pour l'analyse des tendances spatiales et saisonnières des polluants gazeux à l'échelle urbaine. Les études de validation montrent des corrélations comprises entre 0,68 et 0,85 entre les colonnes satellitaires de NO₂ et les mesures de surface (Ialongo et al., 2020; Verhoelst et al., 2021). Toutefois, ces travaux signalent également des biais négatifs pouvant atteindre -23 % à -51 % en zones fortement polluées, principalement liés à la résolution spatiale du capteur et aux profils atmosphériques utilisés dans les algorithmes de restitution (Griffin et al., 2019; Verhoelst et al., 2021). Les données TROPOMI sont donc particulièrement pertinentes pour analyser les variations relatives et les gradients spatiaux, mais doivent être interprétées avec prudence pour l'estimation des niveaux absolus. Plusieurs limites doivent être soulignées. L'interpolation appliquée dans cette étude vise uniquement à améliorer la représentation cartographique et ne crée aucune information supplémentaire au-delà de la résolution native (Mejía C. et al., 2023). Le filtrage nuageux, nécessaire pour garantir la qualité des observations satellitaires, réduit le nombre de pixels exploitables durant les périodes de forte couverture nuageuse, ce qui peut limiter la continuité temporelle des séries en climat tropical. Par ailleurs, les colonnes troposphériques mesurées par satellite représentent une intégration verticale de la concentration atmosphérique et ne correspondent pas directement aux concentrations mesurées au niveau du sol ; l'évaluation sanitaire nécessiterait donc des mesures in situ ou des modèles de transport chimique pour estimer les concentrations de surface (Verhoelst et al., 2021).

Les colonnes maximales de NO_2 ($6,73 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en 2022) et de CO ($5,61 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$) observées durant les saisons sèches traduisent l'influence combinée des émissions anthropiques et de conditions météorologiques moins favorables à la dispersion, notamment durant la période d'Harmattan caractérisée par une atmosphère plus stable. Une variabilité saisonnière comparable a été documentée à Accra, où des mesures au sol montrent des concentrations de NO_2 atteignant $87 \mu\text{g/m}^3$ durant l'Harmattan, avec une augmentation significative par rapport aux périodes non sèches et 60 % des sites dépassant les lignes directrices annuelles de l'OMS (Wang et al., 2022). Bien que ces valeurs correspondent à des concentrations de surface et non à des colonnes troposphériques, la similarité des profils saisonniers confirme l'importance des conditions météorologiques et du trafic routier dans la dynamique régionale du NO_2 . À Abidjan, Bahino et al., (2018) avaient déjà identifié le NO_2 comme polluant majeur sur des sites influencés par le trafic, avec des niveaux plus élevés entre novembre et février. D'autres travaux locaux ont documenté la pollution particulaire via télédétection (N'Guessan Bi et al., 2021) mais les polluants gazeux n'avaient pas fait l'objet d'une analyse systématique multi-annuelle par satellite avant cette étude. À l'échelle internationale, les données TROPOMI ont montré leur capacité à détecter les variations d'émissions urbaines, notamment durant les périodes de réduction d'activité liées à la pandémie de COVID-19 (Wang et al., 2022). Les niveaux observés à Abidjan demeurent inférieurs à ceux rapportés dans certaines grandes métropoles asiatiques (Wei et al., 2023), mais présentent des tendances saisonnières similaires. Spatialement, les colonnes les plus élevées se concentrent dans les communes centrales fortement urbanisées (Plateau, Adjamé, Yopougon, Marcory, Cocody), correspondant aux zones de forte densité de trafic et d'activités économiques. Cette organisation spatiale est cohérente avec les observations antérieures réalisées localement (Bahino et al., 2018). Bien que les colonnes satellitaires ne puissent être directement comparées aux seuils de l'OMS applicables aux concentrations de surface ($40 \mu\text{g/m}^3$ en moyenne annuelle et $200 \mu\text{g/m}^3$ en moyenne horaire pour le NO_2 ; 4 mg/m^3 en moyenne sur 24h pour le CO) (OMS, 2021). La persistance de niveaux élevés en saison sèche dans les zones densément urbanisées souligne la nécessité de mettre en place un réseau permanent de surveillance au sol afin d'évaluer plus précisément l'exposition des populations. Le couplage futur des observations satellitaires avec des modèles de transport chimique permettrait d'estimer les concentrations de surface et d'affiner l'analyse des risques sanitaires. Malgré les limites inhérentes aux données satellitaires, cette étude confirme l'intérêt de la télédétection pour identifier les tendances saisonnières et les zones d'accumulation dans les contextes urbains faiblement instrumentés.

Conclusion

En conclusion, cette étude met en évidence l'intérêt des données satellitaires Sentinel-5P pour l'analyse de la dynamique saisonnière des polluants atmosphériques dans le district d'Abidjan, un contexte urbain tropical marqué par l'insuffisance des réseaux de mesure au sol. L'approche méthodologique combinant Google Earth Engine, cartographie sous ArcGIS Pro et intégration dans un WebSIG interactif a permis de caractériser efficacement la variabilité spatio-temporelle des colonnes troposphériques de NO₂ et de CO sur la période 2019–2023.

Les résultats montrent une intensification des colonnes durant les saisons sèches, confirmant l'influence conjointe des conditions météorologiques et des activités anthropiques, notamment le transport routier et les zones industrielles. L'identification de points chauds persistants souligne la structuration spatiale durable des pressions urbaines sur la qualité de l'air.

Bien que les colonnes satellitaires ne représentent pas directement les concentrations au niveau du sol, elles constituent un indicateur cohérent des tendances relatives et des gradients spatiaux, particulièrement pertinent dans les régions où les infrastructures de surveillance sont limitées. Cette étude confirme la pertinence de la télédétection comme outil complémentaire de suivi atmosphérique en Afrique subsaharienne.

À l'échelle opérationnelle, l'intégration des résultats dans une plateforme WebSIG interactive renforce leur accessibilité et leur potentiel d'aide à la décision. Le développement futur de réseaux de mesure au sol viendrait consolider cette approche et améliorer l'évaluation de l'exposition des populations.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données et du code: Les données Sentinel-5P utilisées dans cette étude sont accessibles publiquement via la plateforme Copernicus Data Space Ecosystem (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). La plateforme WebSIG est accessible à l'adresse : https://nadir02.github.io/polluant_NO2/. Les scripts Google Earth Engine et les flux de traitement sont disponibles sur demande raisonnable auprès de l'auteur correspondant.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Bahino, J., Véronique, Y., Corinne, G.-L., Adon, M., Aristide, A., Keita, S., Liousse, C., Gardrat, E., Chiron, C., Ossouhou, M., Gnamien, S., & Djossou, J. (2018). A pilot study of gaseous pollutants'

- measurement (NO₂, SO₂, NH₃, HNO₃ and O₃) in Abidjan, Côte d'Ivoire : Contribution to an overview of gaseous pollution in African cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 5173-5198. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018>
2. Ejikeme, J., Adogu, K., & Onwuzuligbo, C. (2023). Monitoring of Spatio-Temporal Dynamics of Air Pollution in Enugu Urban using Remote Sensing and GIS. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 4(2), 22-31. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2023.4.2.387>
 3. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
 4. Griffin, D., Zhao, X., McLinden, C. A., Boersma, F., Bourassa, A., Dammers, E., Degenstein, D., Eskes, H., Fehr, L., Fioletov, V., Hayden, K., Kharol, S. K., Li, S. M., Makar, P., Martin, R. V., Mihele, C., Mittermeier, R. L., Krotkov, N., Snee, M., ... Wolde, M. (2019). High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI : First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophysical Research Letters*, 46(2), 1049-1060. <https://doi.org/10.1029/2018GL081095>
 5. HEI, H. E. (2019, janvier 29). *Annual Report 2018*. Health Effects Institute. <https://www.healtheffects.org/publication/annual-report-2018>
 6. Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 205-218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>
 7. Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. (Nil), Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J. I., Breyse, P. N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A. M., Cropper, M. L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., ... Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
 8. Ma, J., Ding, Y., Cheng, J. C. P., Jiang, F., Tan, Y., Gan, V. J. L., & Wan, Z. (2020). Identification of high impact factors of air quality on a national scale using big data and machine learning techniques. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118955>

9. Mejía C., D., Alvarez, H., Zalakeviciute, R., Macancela, D., Sanchez, C., & Bonilla, S. (2023). Sentinel satellite data monitoring of air pollutants with interpolation methods in Guayaquil, Ecuador. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100990>
10. N'Guessan Bi, V. H., Stephanie, L., André, L. J., Bachir, S. M., & Affian, K. (2021). Estimation Des Concentrations Et Cartographie De La Dynamique Des Polluants Atmospheriques Particulaires Dans La Ville D'abidjan. *European Scientific Journal, ESJ*, 17(43), 116-116. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n43p116>
11. OMS. (2008). *Rapport sur la santé dans le monde 2008 : Les soins de santé primaires—Maintenant plus que jamais*. <https://iris.who.int/items/367c3918-3146-4fac-b0f1-641cbbd7ee0d>
12. OMS. (2021, septembre 24). L'OMS resserre ses recommandations pour les particules fines et d'autres polluants. *RevolvAir.org*. <https://revolvair.org/loms-resserre-ses-recommandations-pour-les-particules-fines-et-dautres-polluants/>
13. Sako, N., Beltrando, G., Atta, K. L., N'da, H. D., & Brou, T. (2013). Dynamique forestière et pression urbaine dans le Parc national du Banco (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Vertigo*, 13-2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.14127>
14. Sameh, S., Zarzoura, F., & El-Mewafi, M. (2023). Spatio-temporal Analysis Mapping of Air Quality Monitoring in Cairo using Sentinel-5 satellite data and Google earth engine. *Mansoura Engineering Journal*, 49(1). <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3122>
15. Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference On* -, 517-524. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
16. Tra Bi, F., & Zamblé. (2020). *Evaluation de la qualité de l'air dans le district autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire) à partir des caractéristiques spectrales et biochimiques des feuilles de plantes ornementales*. [Thesis, Université Jean Lorougnon Guédé]. <https://dicames.online/jspui/handle/20.500.12177/5894>
17. Traore, K. M. (2016). *Analyse des vulnérabilités de la ville côtière de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)* [These de Doctorat, Université Felix Houphouet-Boigny de Cocody-Abidjan]. <https://sde.hal.science/tel-01539494>
18. Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., ... Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor : A GMES mission for

- global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment, The Sentinel Missions - New Opportunities for Science*, 120, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
19. Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Boersma, K. F., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., ... Zehner, C. (2021). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 481-510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
 20. Wang, J., Alli, A. S., Clark, S., Hughes, A., Ezzati, M., Beddows, A., Vallarino, J., Nimo, J., Bedford-Moses, J., Baah, S., Owusu, G., Agyemang, E., Kelly, F., Barratt, B., Beevers, S., Agyei-Mensah, S., Baumgartner, J., Brauer, M., & Arku, R. E. (2022). Nitrogen oxides (NO and NO₂) pollution in the Accra metropolis: Spatiotemporal patterns and the role of meteorology. *Science of The Total Environment*, 803, 149931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149931>
 21. Wei, J., Li, Z., Wang, J., Li, C., Gupta, P., & Cribb, M. (2023). Ground-level gaseous pollutants (NO₂, SO₂, and CO) in China: Daily seamless mapping and spatiotemporal variations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2), 1511-1532. <https://doi.org/10.5194/acp-23-1511-2023>
 22. Yang, T., & Liu, W. (2018). Does air pollution affect public health and health inequality? Empirical evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.242>